

2018(平成 30)年度修士論文

UHF 帯 RFID を用いた屋内位置推定方法に関する研究

指導教員 梶原 康博

首都大学東京大学院

システムデザイン研究科

システムデザイン専攻

経営システムデザイン学域

学修番号 : 17892522

田渕 雄也

目次

1	緒言	2
2	RFID システム	5
2.1	RFID の概要	5
2.2	システムの仕様.....	6
2.2.1	Mojix 社 MojixStar3000 を用いたシステム	6
2.2.2	IMPINJ 社 SpeedwayRevolution と xArrayGateway を用いたシステム	7
2.3	床面反射波による読取率への影響.....	9
3	提案手法	12
3.1	電波のマルチパスによる読取率への影響低減対策	12
3.2	位置推定手法と推定モデルの選択.....	16
3.2.1	測定範囲が広域に及ぶ場合の位置および高さ推定	16
3.2.2	仕分け棚を測定範囲とした位置推定	17
3.3	重み係数の修正.....	18
3.4	移動経路補正.....	18
4	適用例	19
4.1	実験概要	19
4.1.1	測定範囲が広域に及ぶ場合の位置および高さ推定実験概要	19
4.1.2	仕分け棚を測定範囲とした位置推定実験概要	20
4.2	推定結果	22
4.2.1	実験 (I)	22
4.2.2	実験 (II)	24
4.2.3	実験 (III)	25
4.2.4	実験 (IV)	27
5	考察	30
6	結言	31
	参考文献	32

1 緒言

近年、インターネットなどを利用した通信販売に代表される多頻度小口の顧客需要拡大による物流環境の複雑化によって、製造業において物流・ロジスティクス事業は高い利益率を出すために重要な分野となっている。しかし、製造業の多くは物流・ロジスティクスに対するノウハウを持たない。そのような背景から、物流業では「荷主企業に代わって、最も効率的な物流戦略の企画立案や物流システムの構築の提案を行い、かつ、それを包括的に受託し、実行する」、3PL (third party logistics) [1]サービスが提供されるようになった。3PL サービスには保管、配送といった物流業務だけでなく、「入荷に伴う検品」、「ピッキング・梱包」、「出荷に伴う検品」といった流通加工も含まれる。この流通加工の精度も物流企業の信頼に関わっており、確実かつ迅速なピッキングや検品が求められている。3PL サービスを扱う物流企業は増加し、競争が激化しているため、より多くの顧客から受注を得るために、物流企業はコスト削減だけでなく、新たな流通加工サービスなどで他社との差別化を図っている。流通加工の新たなサービスとして、「保管している商品のセキュリティ強化」[2]があげられる。精密機器や書類などの高いセキュリティが求められる保管対象を、どの作業者が取り扱ったか、もしくは物流会社が定めた作業者のみが取り扱うことでセキュリティを向上させている。

3PL サービスを提供している物流倉庫では、多種の商品を異なる配送先へ短納期で配送するために、複数のオーダーをまとめてピッキングするトータルピッキング方式を採用していることが多い。トータルピッキングとは、複数のオーダーに対する必要な商品を先にまとめてピッキングし、その後、仕分け場などで個別のオーダー単位に商品を仕分ける方式であり、複数のオーダーをまとめて取りに行くため、作業員の移動距離・時間の短縮が可能である。トータルピッキングはピッキングとしての作業効率は良いが、仕分け作業が必要となり、その仕分け作業をミスなく、効率よくできるかがトータルピッキング全体の作業効率を図るうえで重要となる。仕分け作業を大きく分けると、手仕分けと自動仕分けの2つに分けられる。最も作業者数を削減できる方法はソーターを利用した自動仕分けであるが、高額な設備投資が必要であり、維持費もかかる。手仕分けは作業者の熟練度によって作業効率が大きく異なるため、作業の非熟練化、簡略化かつ一定レベルの作業精度を保つ必要がある。そのような条件を満たした仕分け作業を効率的に行う方法として、ハンディターミナルを用いたものや、ウェアラブル端末を用いたものがある。ハンディターミナルを利用したピッキングは機器の取り扱いやすさから多くの物流センターで利用されている。ウェアラブル端末を利用したものとしては具体的に、眼鏡型ウェアラブル端末を利用した情報表示[3]やグローブ型のスキャナを利用した商品識別[4]などが検討されている。これらの多くはバーコードを利用したものであり、作業者がバーコードをスキャンする必要がある。それに対して、RFID ハンドリーダーを利用した仕分け作業（ゆびキタスソリューション）[5]では、遠隔読み取りで商品識別が可能である。しかし、これら仕分け作業を効率化する方法の検品では作業者がターミナルやハンドリーダーに表示された棚番号を照合しており、作業者の作業負担とな

っている。

また、物流センター全体の効率化、生産性向上のためには、倉庫内在庫管理や入出庫の検品作業の自動化、作業者の動線管理などが求められる。物流センターなどの屋内の生産システムにおいて、生産性向上に必要とされる主要な情報の一つに、人および物の位置情報が挙げられる。位置情報取得の方法としては一般的に、衛星を利用したグローバル・ポジショニング・システム（GPS：Global Positioning System）や画像処理などが知られている。しかし、屋内では衛星からの電波信号を受信することができず、精度が著しく低下するため GPS を工場や倉庫などの屋内における測位対象の位置情報の取得に利用することができない[6]。また、画像処理による位置測位は複数のビデオカメラによって行われるが、棚や機械設備などの遮蔽物が多い環境ではすべての範囲をカバーすることは困難となる[7]。

位置測位の方法としては、その他に超音波、電波などを用いる方法がある。超音波を利用した方法[8]は高精度で対象の位置を推定することが可能であるが、超音波発信機の値段が高価なことやバッテリー容量による使用時間の制約により、多くの対象の位置を同時に推定することができない。電波を利用した位置推定方法の1つに BLE（Bluetooth Low Energy）ビーコンを用いたものがある。BLE とは無線 RAN 技術である Bluetooth の低消費電力の通信モードである。Bluetooth などの電波は、電波発信源から遠ざかるほど、受信時の電波強度が弱くなる性質を持つ。この特性を利用して、BLE ビーコンの RSSI（受信信号強度：Received Signal Strength Indicator）から発信機と受信機との距離を推定する。BLE ビーコンは比較的省電力であるため長時間の位置推定にも利用することが可能であるが、その誤差範囲は 3m 程度と評価されている[9]。電波を利用した位置推定方法としては他に RFID（Radio Frequency Identifier）を用いるものが提案されている。RF タグはスマートフォンなどの電波発生装置、超音波発生装置よりも安価であるため、作業員だけでなくパレットや商品など社外へ運び出される資材にも取り付けることができる。さらに RF タグには書き換え可能な識別番号が設定されており、測位対象の識別が可能である。RFID を用いた位置推定方法では、測位対象の位置を変え、その都度 RF タグの読取率（読み取り試行回数と読み取り成功回数の比で表される）を測定する。Sadr らにより、RF タグの位置と読取率の関係を 2 次元確率密度関数によりモデル化することでタグの位置を推定する方法が提案されている[10]。また、関口らによりニューラルネットワークを用いて RF タグの位置と読取率の関係をモデル化し、RF タグの位置を推定する方法が提案されている[11]。しかし、両方法は位置推定誤差の最大値が 1.5m を超える値となる問題がある。電波を用いた位置推定の誤差が大きくなる要因として、マルチパスによる電波干渉がある[12]。

そこで、本研究では RFID による屋内位置推定を対象として、マルチパスによる影響を低減する方法を提案する。提案方法では複数枚の RF タグを利用して全体の読取率を高め、汎化誤差を指標として RF タグの位置推定に最適なモデルを選択することで位置推定精度の向上を図る。作業者の正確な位置を推定することは倉庫等の屋内生産システムの生産性向上に必要とされるだけでなく、位置情報を利用して作業者が扱うエリアを制限・保障するこ

とで、倉庫等で保管されている商品のセキュリティ向上につながる。また、RF タグによって識別された商品の位置を正しく推定することで、仕分けに伴う検品作業の自動化に役立てる。

2 RFID システム

2.1 RFID の概要

RFID の動作方式には電磁誘導方式と電波方式の 2 つがあり、今回使用する機器はともに UHF (900MHz 帯) の電波方式を利用したものである。その動作原理は、まずリーダライタのアンテナからアンテナ番号等の情報を含むパケットが送信され、RF タグがその電波を受信することにより RF タグが起電する。その発生した電力によって RF タグの制御回路を動作させ、RF タグ内のデータを電波に乗せて RF タグのアンテナから返信する。リーダライタのアンテナで RF タグから返信された電波を受信し、情報を取り出すという流れである。また、バーコードなどの自動認識媒体と比較した場合、データの書き換えが可能である、紙などに対して透過性がある、複数タグを一括して読み取ることができる、といった特徴があることから物流・在庫管理への応用が進んでいる。UHF 帯の RFID は交信距離が長く、また指向性が高いため交信エリアの限定が比較的容易であることが知られている。そこで本研究では、UHF 帯アンテナが、図 1 のように近いほど RF タグの反応が強く、遠くなるほど減衰して反応が弱くなる特性から位置推定ができるのではないかと考えた。

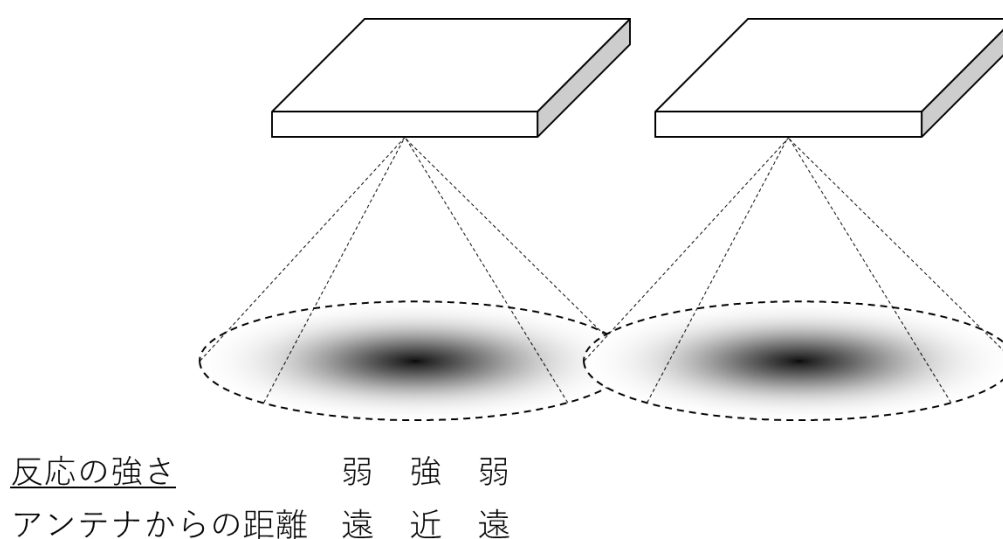


図 1 UHFアンテナの特性

2.2 システムの仕様

本研究では RFID システムとして Mojix 社の MojixStar3000, IMPINJ 社の xArrayGateway と SpeedwayRevolution を使用して構成する。

2.2.1 Mojix 社 MojixStar3000 を用いたシステム

MojixStar3000 は RF タグに電力と情報を供給する送信機と RF タグから情報を受け取る受信機が独立しているシステムである。電波帯は 920MHz の UHF 帯を使用し、通信距離が長いので遠方のタグまで検出が可能である。本システムの受信機にあたる、STAR レシーバーは約 200m までの範囲の RF タグの検出が可能である。また、同時に多数の送信機から電波を送信することが可能である。このような特性から複数の送信機を設置し、読み取り率のパターンから、測定範囲が広範囲に及ぶ場合の位置及び高さの推定を行う手法の提案を行う。システムの構成を図 2 に示す。

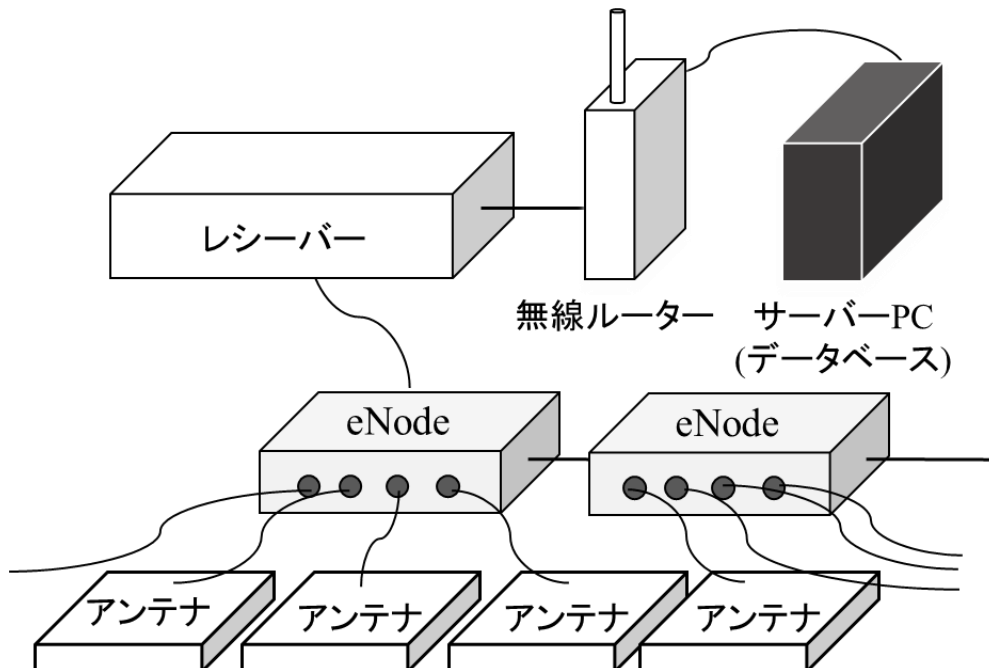


図 2 MojixStar3000を用いたシステム構成

サーバー機である Mojix Master Controller, 受信, 情報通信の役割を行う STAR レシーバー, 情報の送信や電力の供給を行う中継器 (eNode), 電波を送信するアンテナ, 測定データ蓄積の役割を果たすデータベースから構成される。受信機, 中継器, アンテナ間は全て同軸ケーブルを用いて接続する。レシーバーから数珠繋ぎに中継器を接続させることが可能である。また, 1 つの中継器に対して, 4 枚のアンテナが接続可能となっている。無線ルーター, サーバーPC の間の接続には LAN ケーブルを用いて, レシーバーから得られた情報をデータベースへ保存する。また, 無線ルーターを通して外部からデータベースにアクセスを行い, 必要に応じてデータを読み出し, アプリケーションサーバで処理を行う。

2.2.2 IMPINJ 社 SpeedwayRevolution と xArrayGateway を用いたシステム

SpeedwayRevolution は本体に直接アンテナをつなぐことでアンテナから電波を送受信する機器であり、つないだアンテナ 1 つ 1 つが送信機と受信機の両方の役割を担う機器である (図 3 左). また, xArrayGateway は SpeedwayRevolution をベースとして, 52 パターンの直接偏波を形成するアンテナを内蔵した, 送信機と受信機が一体となっているアレイ方式の機器である (図 3 右).



図 3 SpeedwayRevolution と xArrayGateway

MojixStar3000 と比べて, 読み取り可能な範囲は限られているが, 52 方向のビームアンテナによって省スペースで RF タグのおおよその位置を知ることが可能である (図 4).

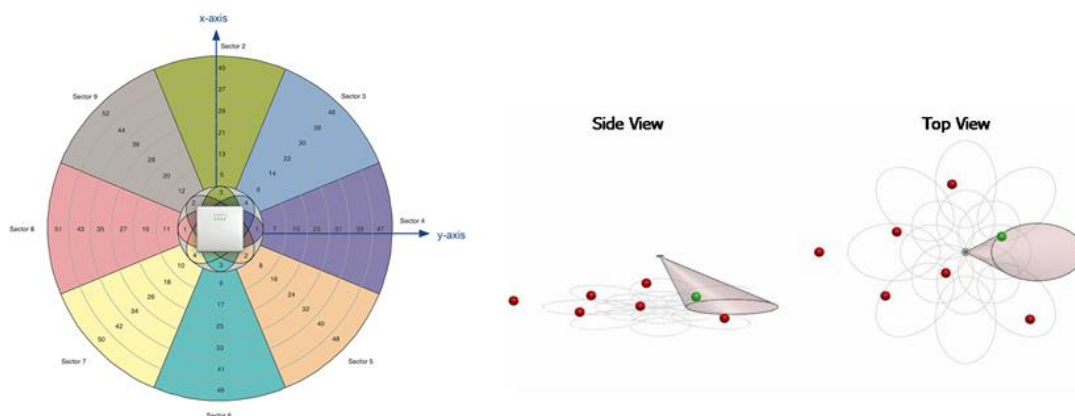


図 4 xArrayGateway のアンテナビームイメージ

システムの構成を以下の図 5 に示す。測定データの蓄積，RF タグの位置推定，シーケンス制御装置への指令を行う PC，棚間口の RF タグの位置を推定するための xArrayGateway，手に持った対象を判別するための SpeedwayRevolution から構成される。PC, xArrayGateway, SpeedwayRevolution は LAN ケーブルで接続，SpeedwayRevolution とアンテナは同軸ケーブルで接続，PC とシーケンス制御装置は I/O コンバータを介して接続されている。SpeedwayRevolution から得られた RF タグの情報から対象を判別し，モニタにその対象を仕分けるべき棚間口の位置を表示，また，その棚間口に付けられた LED ランプを点灯する。仕分け後，xArrayGateway からの RF タグの情報によって RF タグの位置を推定し，仕分け作業の効率化と検品の自動化を試みる。

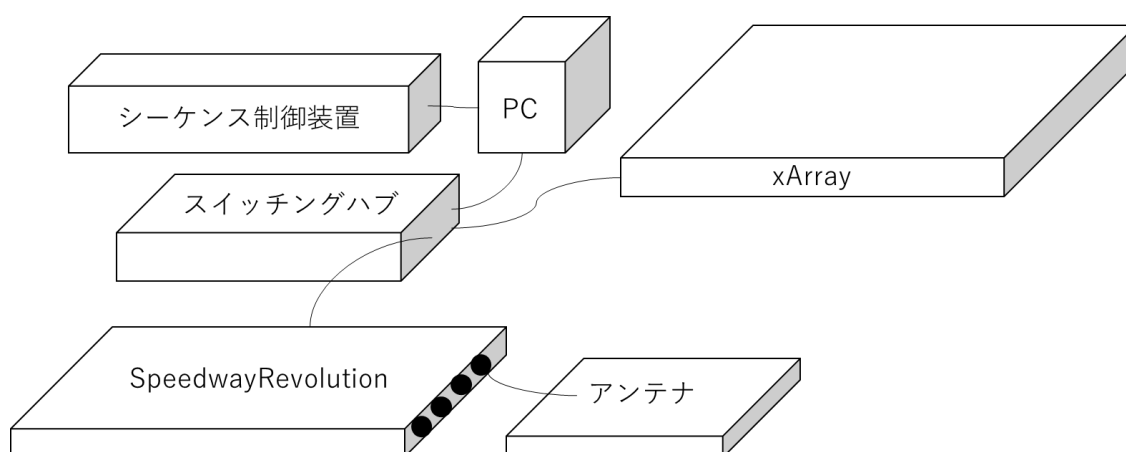


図 5 SpeedwayRevolutionとxArrayGatewayを用いたシステム

2.3 床面反射波による読取率への影響

本研究では，読取率 r を測定し測定範囲が広範囲に及ぶ場合の位置及び高さの推定を行う．読取率 r は各アンテナによるタグ検知のための読取試行回数 q_0 と読取成功回数 q との比率であり，式（1）により表される．

$$r = \frac{q}{q_0} \quad (1)$$

読取率はアンテナ毎に測定する．一般的に読取率はアンテナ直下では 1.0 に近い値となり，アンテナ直下から離れるほど読取率は低下し，測定範囲外では 0 となる．向の研究[13]によると，アンテナ直下近傍にもかかわらず読取率が 0 となる場所（ヌル点）があることがわかっている（図 6）．ヌル点が生じる要因の一つとして，アンテナから RF タグに直接到達する電波（以下，直接波）と，床や壁などに反射してから RF タグに到達する電波（以下，反射波）とのマルチパスの経路差により電波干渉が起き，RF タグの起電に必要な電界強度が得られないことが挙げられる．

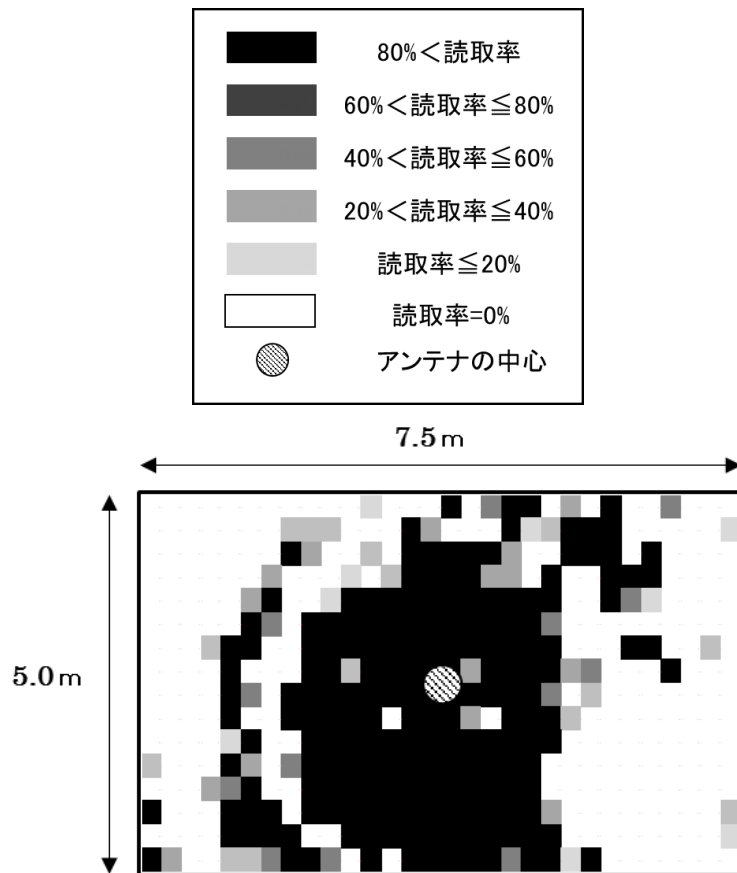


図 6 1枚のアンテナにおける読み取り可能範囲（30dbm）

アンテナにはいくつかの形状があり，形状により電界強度の分布が変わることがわかっている．ここでは無指向性アンテナの場合についての床面からの反射波による電界強度の影響について考える．アンテナから送信される直接波と床面からの反射波の伝搬経路を以下に示す．

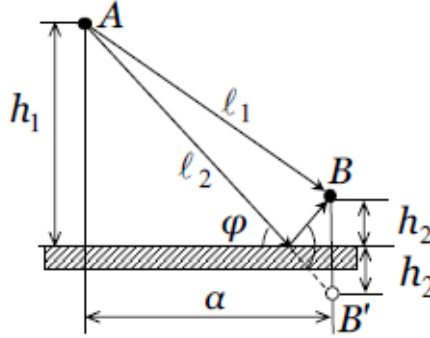


図 7 直接波と反射波の伝搬経路

アンテナの位置 A を高さ h_1 ，RF タグの位置 B を高さ h_2 ，アンテナから RF タグまでの水平距離を α とすると，直接波の経路長 ℓ_1 と反射波の経路長 ℓ_2 は以下ようになる．

$$\ell_1 = \sqrt{\alpha^2 + (h_2 - h_1)^2}$$

$$\ell_2 = \sqrt{\alpha^2 + (h_2 + h_1)^2}$$

ここで，電波の波長を λ とすれば，直接波と反射波の間には位相遅れ $\varphi = \delta + \psi$ が生じる．

$\delta = 2\pi(\ell_1 - \ell_2)/\lambda$ は経路長差による位相遅れ， ψ は反射波による経路差を表す．つまり，位相遅れ φ は経路差 $(\ell_1 - \ell_2)$ に比例することがわかる．

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(\ell_1 - \ell_2) + \psi$$

また，A 点の電界強度を E_0 とすれば，B 点での直接波による電界強度 E_1 および反射波による電界強度 E_2 は次式で表され， E_1 と E_2 経路長の 2 乗に反比例する．

$$E_1 = \frac{E_0}{4\pi\ell_1^2} \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{E_0}{4\pi\ell_2^2} \quad (3)$$

また，B 点での電界強度 E は直接波と反射波の合成波となる．直接波と反射波には位相遅れが生じるため，電界強度 E ， E_1 および E_2 の関係は図 8 のようになる．B 点での電界強度 E の大きさは， E_2 を E_1 と平行な成分と垂直な成分に分解することにより，次式によるユークリッド距離で与えられる．

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{(E_1 - E_2 \cdot \cos(\varphi - \pi))^2 + (E_2 \cdot \sin(\varphi - \pi))^2} \\ &= \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2\cos(\varphi - \pi)} \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) において， E_1 および E_2 は経路長の 2 乗に反比例し，位相遅れ φ は経路長差($\ell_1 - \ell_2$)に比例することから，電界強度 E は経路長の増加により規則的に変動することがわかる．そのため，式 (4) で表される B 点での電界強度 E が極小となる場合，ヌル点が生じやすくなる．

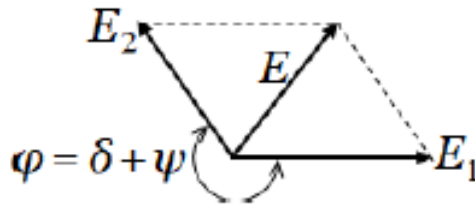


図 8 直接波と反射波の合成波

3 提案手法

3.1 電波のマルチパスによる読取率への影響低減対策

2.1 節で述べたように RF タグは電波を受け内部アンテナが起電し、制御回路の動作に必要な電力が発生するため、電界強度が高いほど起電されやすく読取率も高くなる。しかし、前述したヌル点においては、RF タグを起電させるために必要な電界強度を得ることができず、RF タグがアンテナの交信範囲内にあるのか交信範囲外であるかを読取率から判断することが困難となる。式 (4) より、アンテナからタグまでの水平距離 α が同じでも RF タグの高さが異なれば経路長差も変化するので電界強度も異なる。このことから、本研究では位置測定対象に高さを変えて複数の RF タグを取り付けることでマルチパスによる読取率の低減を抑えることにする。

また、アンテナから RF タグまでの水平距離 α の増加に伴い、読取率が滑らかに減少すれば、読取率が不規則に変化する場合と比較して RF タグの位置精度が高まると考え、複数の RF タグの読取率に重み係数を乗じて合計値を算出することにする。先行研究より、読取率は電界強度に比例すると考えられるため、読取率に乘じる重み係数を式 (2) および式 (4) により与えられる電界強度を参考に設定する。

アンテナ直下を中心 (x_0, y_0) 、中心から水平距離 α 離れた高さ h の位置を (x_α, y_α) とすると、水平距離 α は以下のように表すことができる。

$$\alpha = \sqrt{(x_\alpha - x_0)^2 + (y_\alpha - y_0)^2}$$

水平距離 α をアンテナの交信範囲全体で変化させるとき、 (x_α, y_α) での床面反射波を考慮しない電界強度（自由伝搬電界強度）を $f(\alpha)$ と表す。同様に、高さが異なる j 番目の RF タグにおいて式 (4) から算出される電界強度を $f_j(\alpha)$ とする。重み付けされた電界強度 $f_j(\alpha)$ の合計値を $f'_j(\alpha)$ とする。

$$f'_j(\alpha) = \sum_{j=1}^J w_j \cdot f_j(\alpha) \quad (5)$$

$$\text{ただし, } \sum_{j=1}^J w_j = 1, w_j \geq 0 \quad (6)$$

重み係数 \vec{w}^* を求める方法として Kullback–Leibler 情報量を用いる。Kullback–Leibler 情報量 D_{KL} は異なる確率分布の差異を図るものであり、自由伝搬電界強度 $f(\alpha)$ と重み付けされた電界強度の合計値 $f'_j(\alpha)$ との Kullback–Leibler 情報量 D_{KL} を最小化することで、自由伝搬電界強度に近いモデルを作成することができる。 $f(\alpha)$ と $f'_j(\alpha)$ との Kullback–Leibler 情報量 D_{KL} は以下で定義される。

$$D_{KL}(f(\alpha) \parallel f'_j(\alpha)) = \sum f(\alpha) \log \frac{f(\alpha)}{f'_j(\alpha)} \quad (7)$$

$$\vec{w}^* = \arg \min_{\vec{w}^*} D_{KL}(f(\alpha) \parallel f'_j(\alpha)) \quad (8)$$

式 (8) を満たす重み係数 \vec{w}^* を求める。

ここで、床面反射による電波干渉を考慮して重み係数を求める数値例を示す。アンテナの高さを 2.9m, アンテナ面の電界強度を $E_0 = 1$, 電波の波長を 0.33m と仮定すると、床面から 1.0m の高さにおいて、反射を考慮しない自由伝搬電界強度（式（2））は図 9 のようになる。RF タグがアンテナ直下から遠ざかるにつれて電界強度が滑らかに減少していることがわかる。

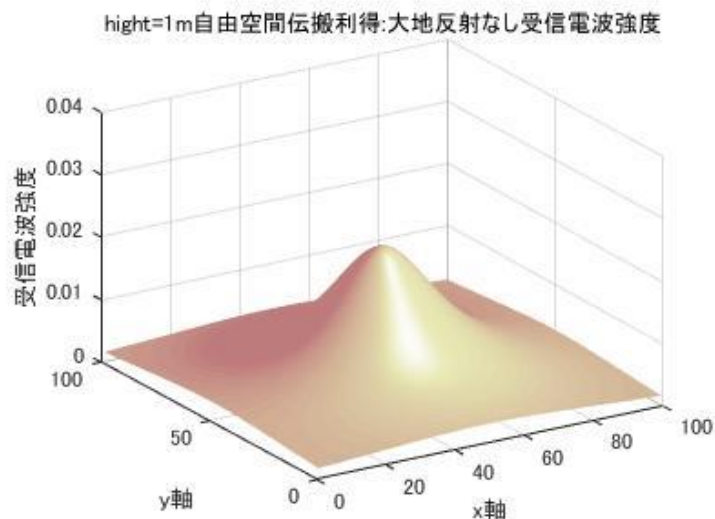


図 9 高さ1.0mにおける自由伝搬電界強度

次に、RF タグの高さを 1.1m, 1.0m, 0.9m としたときの床面反射を考慮した電界強度（式（4））を図 10 から図 12 で表す。RF タグの高さが異なることで同じ水平距離であっても電界強度が異なることがわかる。

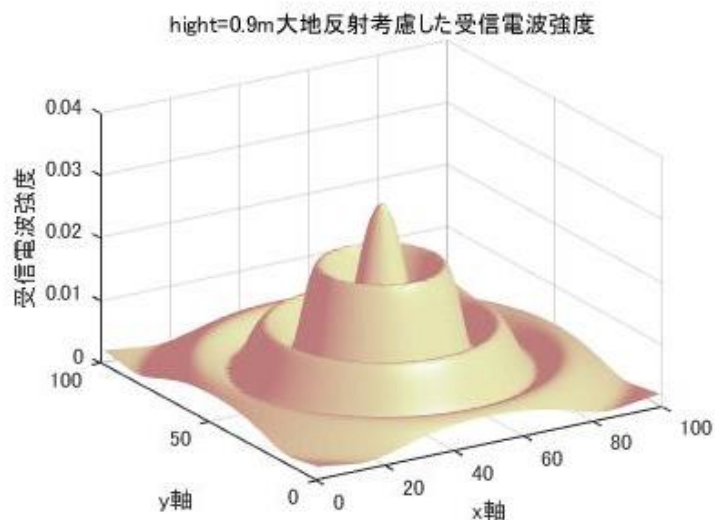


図 10 高さ0.9mにおける床面反射波を考慮した電界強度

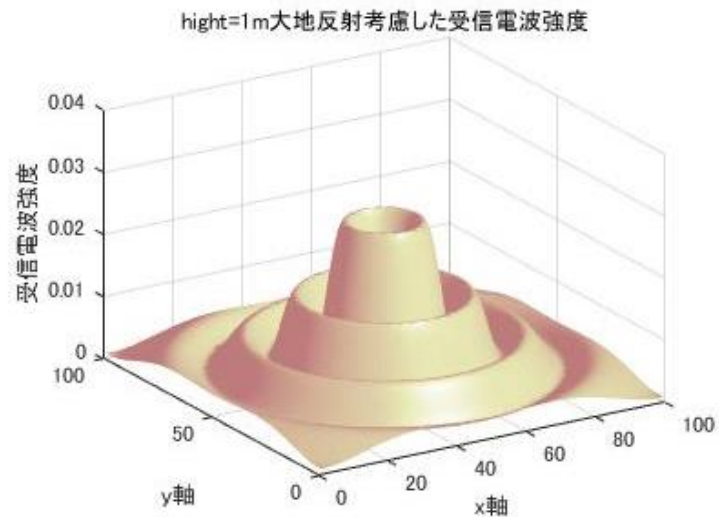


図 12 高さ1.0mにおける床面反射波を考慮した電界強度

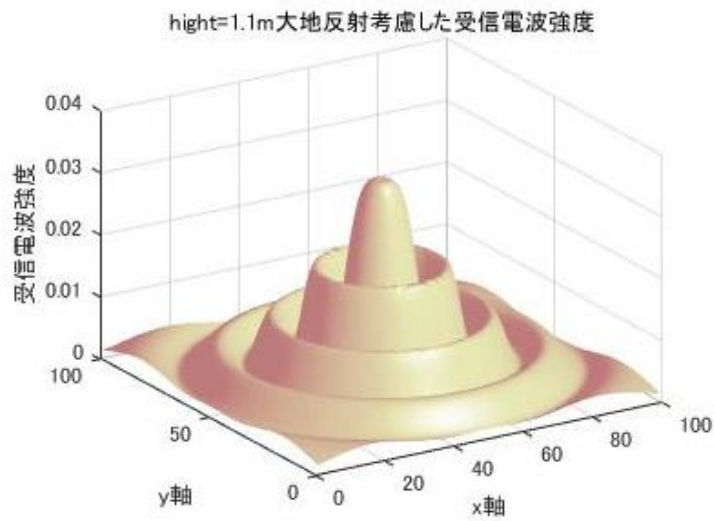


図 11 高さ1.1mにおける床面反射波を考慮した電界強度

上記に示した 3 つの異なる高さにおける電界強度について、式 (8) を満たすように重み係数を変化させた。その結果、重み係数の値として以下の結果が得られ、重み付けされた合成電界強度は図 13 のようになった。

$$w_1 = 0.28, w_2 = 0.46, w_3 = 0.26$$

図 13 より、合成前にみられた極小値が減少しており、自由伝搬電界強度と同様に振幅が滑らかになっていることがわかる。そのため、上記手順により求まる重み係数を読取率に乗じた合成値もアンテナから RF タグまでの水平距離の増加に伴い、滑らかに減少すると考えられる。

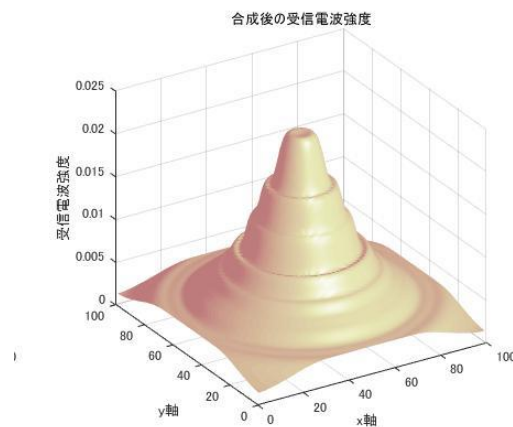


図 13 重み付け後の合成電界強度

しかし、実際の生産現場や倉庫などでは床だけでなく壁、機械設備、棚や人などによる電波の反射が考えられるため、重み係数は使用するアンテナの形状および現場の環境に合わせて設定する必要があると考えられる。そこで、適用例では合成値の初期値として J 枚の RF タグの読取率の平均値が算出されるように、各重み係数を以下のように設定する。

$$w_j = 1/J$$

その後、次節で述べる位置推定モデルを決定し、位置推定環境に合わせて重み係数を修正する。

3.2 位置推定手法と推定モデルの選択

本研究では前述のとおり，位置推定を行う RFID システムとして，測定範囲が広域に及ぶ場合には MojixStar3000 を使用し，棚間口には xArrayGateway を使用する．両 RFID システムの読取試行回数はともに平均値で約 60.5 回／秒であるが，MojixStar3000 ではアンテナを 11 枚使用するのに対して，xArrayGateway では 52 枚のアンテナを使用するため，後者では各アンテナによる読取試行回数が 1.2 回／秒となり，短時間で読取率の違いを取得することが困難となる．そこで，MojixStar3000 を使用する場合には，前述した複数枚の RF タグからの読取率（以後各アンテナからの読取率）に重み係数を乗じて合計した読取率（以後，読取率）を用いて位置推定モデルを求め，xArrayGateway を使用する場合は各アンテナからの RSSI（Received Signal Strength Indicator：受信信号強度）を用いて位置推定モデルを求めることにする．

3.2.1 測定範囲が広域に及ぶ場合の位置および高さ推定

本節では MojixStar3000 を用いた位置推定モデルの選定について述べる．アンテナの電波出力を下げることで交信範囲が狭まる．そこで，位置推定に用いる変数を増やすことを目的として，複数の電波出力を使用することにする．測位対象に異なる高さで複数枚の RF タグを取り付け，あらかじめ一定間隔で設定されたポイント上を移動させ，測位対象の位置（測定点）毎に各アンテナからの読取率を測定する．次に，RF タグの位置と読取率との関係を表す推定モデルを求める．推定モデルとしては線形判別モデル，決定木，k 最近傍モデル，ニューラルネットワークなどが挙げられる．これら複数の推定モデルの性能評価の指標として，K 分割交差検証法を用いて得られる汎化誤差を用いる．

アンテナの個数を n_1 ，出力電波の数を n_2 とすると，測定点における j 番目の RF タグの読取率 \vec{r} は N 次元の入力ベクトルとして以下のように表すことができる．

$$\vec{r} = (r_1, \dots, r_N)^T \in R^N \\ (N = n_1 \times n_2 \times J)$$

測定点の実測位置を $\mathbf{y} \in R$ と表し，入出力のペアを (\vec{r}, \mathbf{y}) と表す．入出力のペアの数を M とすると i 番目のペアは (\vec{r}_i, y_i) と表すことができる．この入出力に対して本研究では，推定モデル $\mathbf{y} = f(\vec{r}, \vec{\omega}, \theta)$ で表現できるように制御変数 $\vec{\omega}$ と推定モデル変数 θ を求める．

次にすべての入出力のペアをデータセット $D = \{(\vec{r}_1, y_1), \dots, (\vec{r}_M, y_M)\}$ と表し，データセット D をほぼ均等になるように K 個に分割する． K 個に分割したデータセットのうち u 番目のセットを検査セット $C_u (u = 1, \dots, K)$ と表し，データセット D から検査セット C_u を取り除いたものを学習セット L_u とする ($L_u = D \setminus C_u$)．学習セット L_u は推定モデルの制御変数 $\vec{\omega}$ を設定するために用いられる．制御変数 $\vec{\omega}$ が設定された推定モデルに対して検査セット C_u を用いて推定することで，その推定モデルの推定誤差を求める．K 分割交差検証法による汎化誤差 $A(\theta)$ は次式で表される．

$$A(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^K \sum_{(\vec{r}_i, y_i) \in C_u} (y - f(\vec{r}, \vec{\omega}_u, \theta))^2 \quad (9)$$

ここで最適な K の値，すなわち分割数については次式で表されるステージスの公式の考えをもとに決定する．

$$K = \log_2 M + 1 \quad (10)$$

$A(\theta)$ はデータセットを検査セットと学習セットに分けており，学習セットに最もフィッティングする制御変数で表される関数により，学習セットと関連しない検査セットを良く推定できていれば漸近的に予測モデルとしての性能を評価していることにつながる．そこで，想定される複数の推定モデルに対して上記の手順を適用し，汎化誤差が最小となる推定モデルを選定する．

3.2.2 仕分け棚を測定範囲とした位置推定

次に xArrayGateway を使用する場合の位置推定モデルの選択について述べる．前述のとおり各アンテナからの RSSI (Received Signal Strength Indicator : 受信電波強度) を用いて位置推定モデルを求める．RSSI は受信している電波信号の強さを数値化したものであり，RFID だけでなく Wi-Fi や Bluetooth を用いた位置推定を行う際にも用いられている．xArrayGateway では複数の出力電波強度を連続して送信することができず，また，サイズに限りがある測位対象に高さを変えて複数枚の RF タグをつけることは困難であるため，本研究では単一の出力電波強度を使用し，測位対象に対して単一の RF タグを取り付けることにする．前節と同様に，あらかじめ一定間隔で設定されたポイント上を移動させ，測位対象の位置（測定点）毎に各アンテナからの読取率を測定する．各アンテナからの RSSI を RF タグの位置と読取率との関係を表す推定モデルを求める．複数の推定モデルの性能評価の指標として，前節あと同様に K 分割交差検証法を用いて得られる汎化誤差を用いる．

アンテナの個数を n とすると，測定点における j 番目の RF タグの RSSI \vec{r} は n 次元の入力ベクトルとして以下のように表すことができる．

$$\vec{r} = (r_1, \dots, r_n)^T \in R^n$$

測定点の実測位置を $y \in R$ と表し，入出力のペアを (\vec{r}, y) と表す．入出力のペアの数を M とすると i 番目のペアは (\vec{r}_i, y_i) と表すことができる．この入出力に対して本研究では推定モデル $y = f(\vec{r}, \vec{\omega}, \theta)$ で表現できるように制御変数 $\vec{\omega}$ と推定モデル変数 θ を求める．

次に推定モデルの性能を評価するために，前節と同様に式 (9) を最小にする推定モデル θ を選択する．

3.3 重み係数の修正

前節で選択された推定モデルに対して、その位置推定性能を向上する目的として、複数タグの読取率に乘じる重み係数を修正する。3.1 節では重み係数を乗じた合計値が理想的な空間伝搬の電波強度に近づくように各重み係数を設定したが、実環境では床以外にも壁や機械設備などのからの反射波を考慮せねばならないため、重み係数の初期値として読取率の平均値となるように重み係数を設定した。しかし、読取率の平均値では推定モデルによる位置推定誤差が最小化されないため、前節で選定された推定モデルを用いてデータセット D に対する位置推定誤差が最小化されるよう（フィッティング性能が最もよくなるよう）に重み係数 $\vec{w} = (w_1, \dots, w_J)$ を修正する。データセット D に対する位置推定誤差は以下の式で表され、式による制約条件の下で各タグの重み係数 w_j を 0 から 1 の範囲で 0.01 刻みに変化させ（全数探索）、式が満たされるように重み係数を修正する。

$$E(\vec{w}|D) = \sum_{(\vec{r}, y) \in D} (y - f(\vec{r}, \vec{w}, \theta))^2 \quad (11)$$

$$\vec{w}^* = \underset{\vec{w}}{\operatorname{argmin}} E(\vec{w}|D) \quad (11)$$

3.4 移動経路補正

移動対象の動線推定を行う場合、移動対象は、同一の測定点にとどまる時間が短くなるため、複数の電波出力を用いた読取率の測定は時間がかかり、測定点での適切な読取率を測定することが困難となる。また、複数のタグを用いて重み係数を乗じた合計値から位置推定を行う方法では、計算処理に時間を要するため、現場の作業員がリアルタイムで動線分析を行えない。そこで、移動対象の動線推定では出力電波の強度は 1 種類とし、測位対象に取り付けるタグも 1 つとする。そのため、ヌル点が発生しやすくなり位置推定誤差が大きくなることが懸念されるので、移動平均法により動線を補正する。時系列順に得られる推定位置に対して、移動平均の項数を m とし、X座標の移動平均値 xx_i を式、Y座標の移動平均値 yy_i を式で求める。

$$xx_i = \frac{\sum_{c=i-m+1}^i x_c}{m} \quad (13)$$

$$yy_i = \frac{\sum_{c=i-m+1}^i y_c}{m} \quad (14)$$

4.1 実験概要

本研究では、測定範囲が広範囲に及ぶ場合の材料や工具、製品などを対象とした位置および高さの推定、また測定対象を人とした場合の動線推定を MojixStar3000 システムを使用し行う。今回 MojixStar3000 に 11 個のアンテナを接続し、それぞれを図 14 のように配置した。各アンテナは高さ 2.9m の位置に鉛直下向きに設置した。測定範囲は図中の 5m×7m とし、測定範囲内に 0.5m 間隔で測定点を 117 点設ける（x 軸方向に 9 点、y 軸方向に 13 点）。



4.1.2 仕分け棚を測定範囲とした位置推定実験概要

仕分け棚を測定範囲とした製品の仕分け，検品作業の自動化のための位置推定には SpeedwayRevolution と xArrayGateway システムを用いる．SpeedwayRevolution にはアンテナを 1 つ接続し，その通信範囲を限定するために，中心を開けた金属板をアンテナ面に取り付ける（図 15）．そのアンテナは床面に鉛直上向きに設置し，その上を通過した RF タグを判別するために用いる．xArrayGateway は測定範囲の棚から 1.9m の位置で高さ 2.9m に鉛直下向きから少し角度をつけた状態で設置する（図 16）．図 16 のように測定範囲を設定し，それぞれの棚のエリア(x_i, y_i)を(1,1)から(3,3)と表現し，測定点を 9 点設ける．

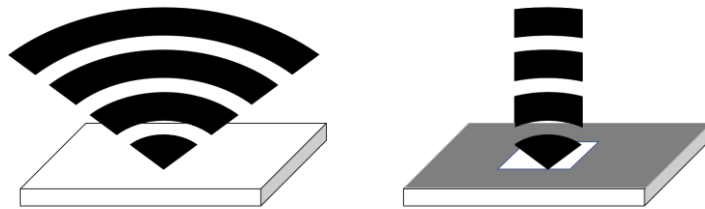


図 15 通信範囲の制限

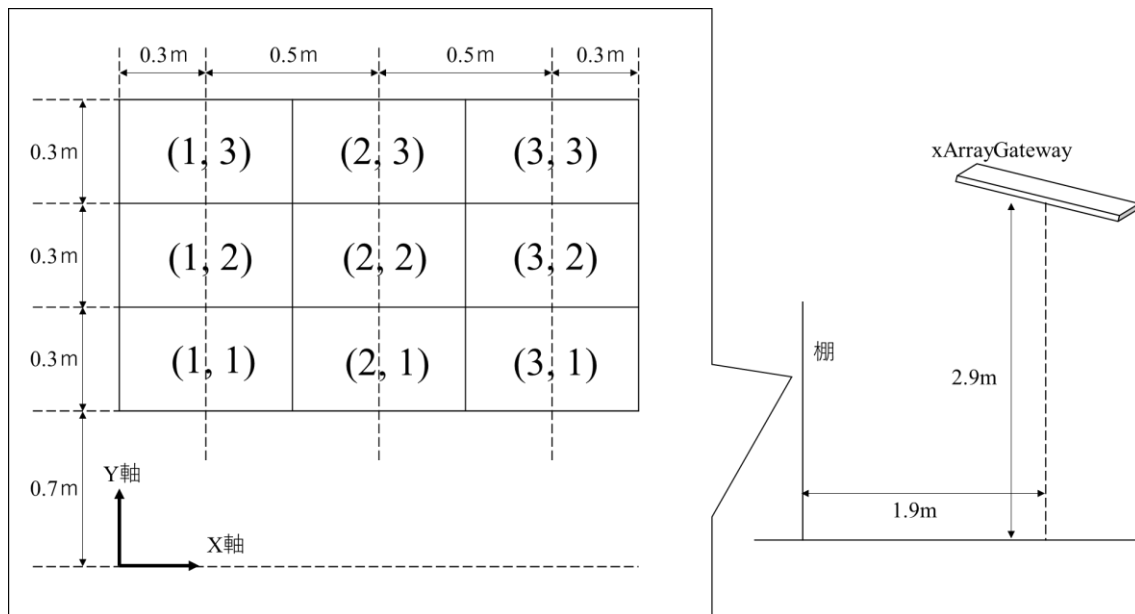


図 16 測定範囲とアンテナの設定位置

仕分け，検品作業の自動化のシステムフローを以下に示す．

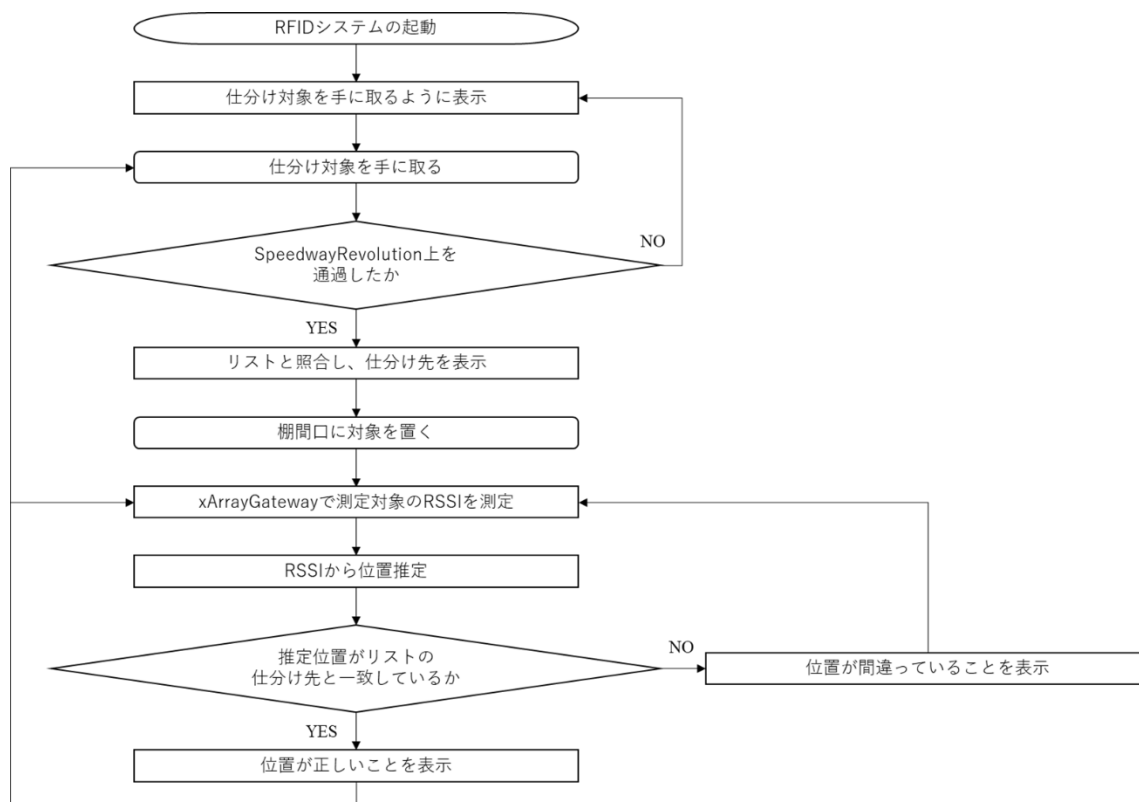


図 17 仕分け，検品作業の自動化のシステムフロー

4.2 推定結果

測定範囲が広範囲に及ぶ場合の静止対象の位置推定実験を実験（Ⅰ）、高さ推定実験を実験（Ⅱ）、移動対象の動線推定実験を実験（Ⅲ）、仕分け棚を測定範囲とした位置推定実験を実験（Ⅳ）として、それぞれの結果をまとめる。

4.2.1 実験（Ⅰ）

静止対象の位置推定精度を調べるために、棚の上段（1.0m）に測位対象が置かれている状況を想定した。複数の RF タグ全体の読取率が向上するように電波の波長を考慮して、10cm の間隔で 3 枚の RF タグを取り付けた（0.9m, 1.0m, 1.1m）。

（ア） 読取率の測定

4.1.1 節で述べた 117 点の測定点上を移動させて 10 秒間かけて読取率を測定した。電波出力は、電波法により電波出力の上限が 1W と定められているので、上限値として 30dBm を用いる。電波出力が高すぎると、測定範囲内で複数のアンテナからの読取率が 1 となる点が増えてしまい、位置推定精度が低下してしまうことが考えられるので、もう 1 つの出力電波強度として 29dBm を用いる。測定範囲内のすべての点で、3 つの RF タグの読取率の測定を 4 回繰り返した。各アンテナからの読取率に乘じる重み値 w_j は、初期値として $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$ とした。アンテナの個数が 11 個、出力電波のレベル数が 2 であるので、22 次元の入力ベクトルと実測位置のペア 468 組（117 点×4 回）からなるデータセット D を得た。

（イ） 推定モデルの選定

データセット D に対する推定モデルとして、線形判別モデル、決定木、 k 最近傍モデル、NN を選択し、それぞれの推定性能を評価した。決定木におけるノード分岐のための多様性指数にはジニ係数を用いた。NN については入力層、中間層 2 層、出力層からなる 4 層構造とした。各層のノード数を 22, 11, 6, 13 とした。中間層の伝達関数には双曲線シグモイド関数、出力層の伝達関数には線形関数を用いた。各推定モデルの K 分割交差検証法による汎化誤差を表 1 に示す。ただし、分割数 K は式（10）より 9 とした。表 1 より汎化誤差が最小となる k 最近傍モデルを選択する。

表 1 静止対象位置推定モデルの汎化誤差

推定モデル	汎化誤差
線形判別モデル	175.33
決定木	7.37
k 最近傍モデル	4.00
NN	39.33

（ウ） 重み係数の修正

複数ある推定モデルの中から、汎化誤差が最小となるように選ばれた k 最近傍モデルを用いて、式（13）によって表される、データセット D に最もフィッティングする重み係数 \vec{w}^* は以下ようになった。

$$w_1 = 0.27, w_2 = 0.17, w_3 = 0.56$$

これらの値を修正後の重み係数とし、再度、全データセット D に最もフィッティングする k 最近傍モデルの制御変数 \bar{w} を求め、位置推定モデルとした。

(エ) 推定精度

データセット D とは別に、測定範囲内のすべての測定点 117 点で新たに読取率を測定した。前節で位置推定モデルとして選定された k 最近傍モデルを用いて、117 点の読取率に対して静止対象の位置推定を行った。その推定結果を表 2、図 18 に示す。図 17 中の円は位置推定誤差の大きさを表しており、4 か所で位置推定誤差が生じた。

表 2 静止対象の位置推定誤差

位置推定誤差	(m)
平均値	0.02
標準偏差	0.004
最大値	1.0

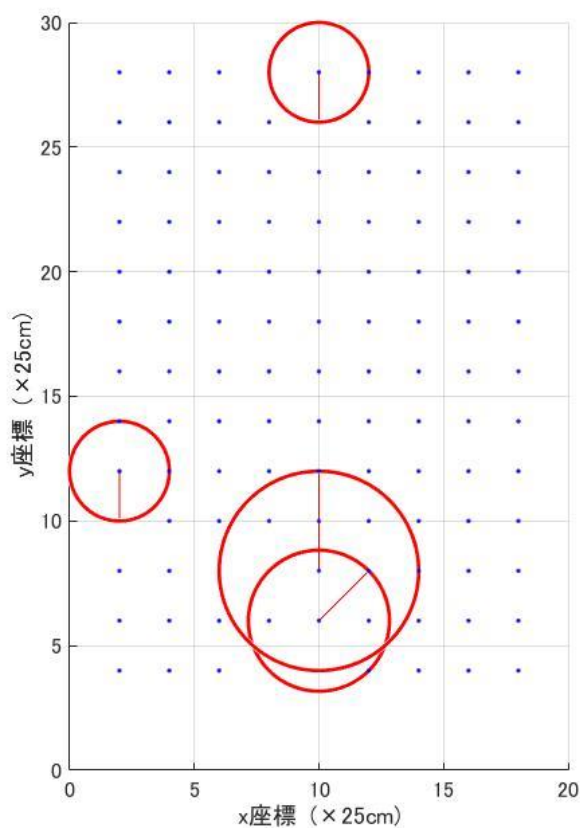


図 18 静止対象の位置推定誤差

4.2.2 実験（Ⅱ）

静止対象の高さ推定精度を調べるために、棚の上段（1.0m）と下段（0.2m）に測位対象が置かれている状況を想定した。複数の RF タグ全体の読取率が向上するように電波の波長を考慮して、10cm の間隔で 3 枚の RF タグを、高さが 1.0m の測位対象には 0.9m, 1.0m, 1.1m の高さで取り付け、高さが 0.2m の測位対象には 0.1m, 0.2m, 0.3m の高さで取り付けた。

（ア） 読取率の測定

実験（Ⅰ）と同様に、117 点の測定点上を移動させて 10 秒間かけて読取率を測定した。測定範囲内のすべての点で 2 種類の高さについて、それぞれ 3 枚の RF タグの読取率の測定を 4 回繰り返した。アンテナの個数が 11 個、出力電波のレベル数が 2 であるので、22 次元の入力ベクトルと実測位置のペア 936 組（117 点×2 種類の高さ×4 回）からなるデータセット D を得た。

（イ） 推定モデルの選定

データセット D に対する推定モデルとして、線形判別モデル、決定木、 k 最近傍モデル、NN を選択し、それぞれの推定性能を評価した。各推定モデルの K 分割交差検証法による汎化誤差を表 3 に示す。ただし、分割数 K は式（10）より 9 とした。表 3 より汎化誤差はすべての推定モデルで 0 となったので、前節と同様に k 最近傍モデルを選択する。

表 3 高さ推定モデルの汎化誤差

推定モデル	汎化誤差
線形判別モデル	0
決定木	0
k 最近傍モデル	0
NN	0

（ウ） 重み係数の修正

汎化誤差が 0 であったので、高さ推定に用いる読取率に乗じる重み係数の修正は行わず、初期値のままとし、 k 最近傍モデルを高さ推定モデルとした。

（エ） 推定精度

データセット D とは別に、測定範囲内のすべての測定点 117 点で新たに 0.2m, 1.0m の高さで読取率を測定した。前節で高さ推定モデルとして選定された k 最近傍モデルを用いて、117 点の高さ 0.2m, 1.0m での読取率に対して静止対象の高さ推定を行った。その推定結果を表 4 に示す。静止対象の高さが 0.2m および 1.0m のいずれの場合でも、すべての点で正しく高さを推定することができた。

表 4 静止対象の高さ推定誤差

位置推定誤差	(m)
平均値	0
標準偏差	0
最大値	0

4.2.3 実験（Ⅲ）

移動対象の動線推定として、作業者などの人を想定した．3.4 節で述べたように，移動対象の動線推定をリアルタイムで行うことを目標としており，できるだけ計算量を抑えるために単一の RF タグを 1.0m の高さで人に取り付けた．

（ア） 読取率の測定

出力電波は 1 出力とし，測定範囲内の 117 点の測定点上を RF タグを取り付けた人が移動し読取率を測定する実験を 4 回繰り返した．アンテナの個数が 11 個，出力電波のレベル数が 1 であるので，11 次元の入力ベクトルと実測位置のペア 468 組（117 点×4 回）からなるデータセット D を得た．

（イ） 推定モデルの選定

データセット D に対する推定モデルとして，線形判別モデル，決定木， k 最近傍モデル，NN を選択し，それぞれの推定性能を評価した．各推定モデルの K 分割交差検証法による汎化誤差を表 5 に示す．ただし，分割数 K は式 (10) より 9 とした． k 最近傍モデルの汎化誤差が最小となった．

表 5 移動対象位置推定モデルの汎化誤差

推定モデル	汎化誤差
線形判別モデル	4.06
決定木	2.11
k 最近傍モデル	1.53
NN	5.94

（ウ） 動線推定と推定結果の補正

移動対象は測定範囲内を約 40 秒間移動し，読取率は毎秒 1 回測定した．また，その移動対象の様子をビデオカメラで撮影し，床面にあらかじめ設けられたマーカにより，移動対象の足元の位置を測定した．前節で選定された k 最近傍モデルを用いて約 40 秒間に得られたデータに対して動線推定を行った．得られた推定結果に対して，移動平均を用いた式 (14)，(15) による補正を行う．移動平均の項数は 5 とした．実測された作業者の動線および読取率から推定された動線を補正したものを図 19 に示す．補正後の動線の推定誤差は表 6 のようになった．

表 6 推定誤差

位置推定誤差	(m)
平均値	0.22
標準偏差	0.14
最大値	0.43

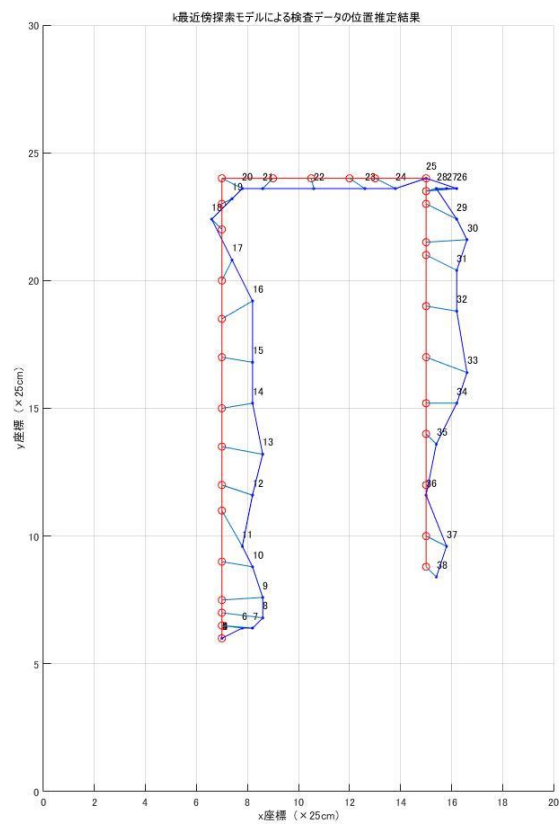


図 19 移動対象の動線推定結果

(エ) 推定精度

前節同様の実験を 5 回繰り返した。5 回の測定による動線の推定誤差は表 7 のようになった。

表 7 5 回の実験による推定誤差

位置推定誤差	(m)
平均値	0.29
標準偏差	0.09
最大値	0.66

4.2.4 実験 (IV)

製品などの測位対象が、棚間口 (図 16 左) に置かれている状況を想定し、静止対象の高さおよび位置の推定精度を調べた。

(ア) RSSI の測定

図 16 左のように設定された測定範囲内の各座標(1,1)から(3,3)において、それぞれで 30 回ずつ 10 秒間かけて RSSI を測定した。なお、仕分け作業の際には作業員により棚間口が隠れることを考慮し、各測定点における 1~10 回は障害物がない環境、11~30 回は作業員が棚間口の前にいる場合の RSSI を測定した。アンテナの個数が 52 個、出力電波のレベル数が 1 であるので、52 次元の入力ベクトルと実測位置のペア 270 組 (9 点×30 回) からなるデータセット D を得た。

(イ) 推定モデルの選定

データセット D に対する推定モデルとして、線形判別モデル、決定木、 k 最近傍モデルを選択し、それぞれの推定性能を評価した。各推定モデルの K 分割交差検証法による汎化誤差を表 8 に示す。ただし、分割数 K は式 (10) より 9 とした。表 8 より、 k 最近傍モデルの汎化誤差が最小となったため、 k 最近傍モデルを推定モデルとする。

表 8 推定モデルの汎化誤差

推定モデル	汎化誤差
線形判別モデル	0.50
決定木	7.07
k 最近傍モデル	0

(ウ) 推定精度

データセットDとは別に、測定範囲内のすべての測定点9点で新たにRSSIを10回ずつ測定した。前節で推定モデルとして選定されたk最近傍モデルを用いて、9点でのRSSIに対して静止対象の位置および高さ推定を行った。その推定結果を図9に示す。90点すべてで正しく位置および高さを推定することができた。

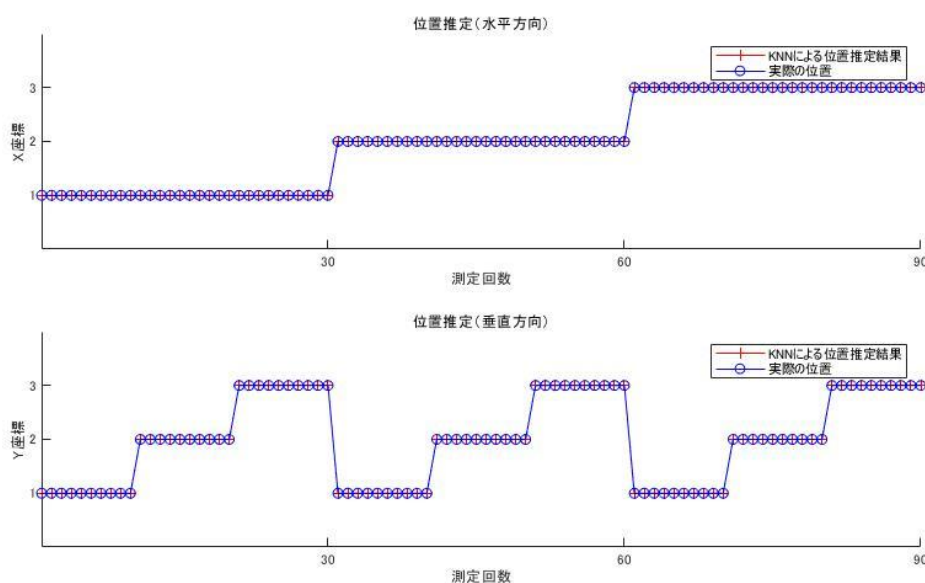


図 20 位置推定精度

(エ) システム化

前節で選定した推定モデルの有用性が示されたので、仕分け作業効率化および検品自動化システムとしての試作機を運用する。まず、各棚間口へのLEDランプ取り付けと、測位対象ごとに仕分け先をまとめたリストを作成する(表9)。SpeedwayRevolutionによって判別された対象の仕分け先をリストから調べ、モニタに仕分け先を表示するとともに、仕分け先のLEDランプを点灯することで仕分け作業を効率化する。モニタの表示とLEDが点灯している様子を図21に表す。

表 9 リストの例

タグID	X	Y
001	1	1
002	1	2
101	2	3
102	3	1

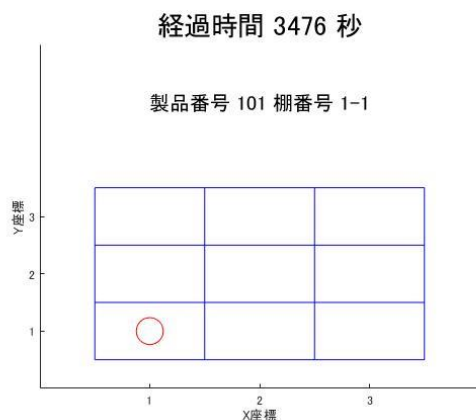


図 21 モニタの表示とLEDランプが点灯している様子

その後、xArrayGateway によって対象の RSSI を測定し、選定された推定モデルを用いて位置推定を行う。位置推定の結果、対象が正しい仕分け先に納入されていれば、モニタに「対象が正しい位置にある」ことを表示し、LED ランプを消灯する。対象が誤った場所に納入されていると推定された場合は、「対象が誤った位置にある」ことを示し、継続して LED ランプを点灯する（図 22）。

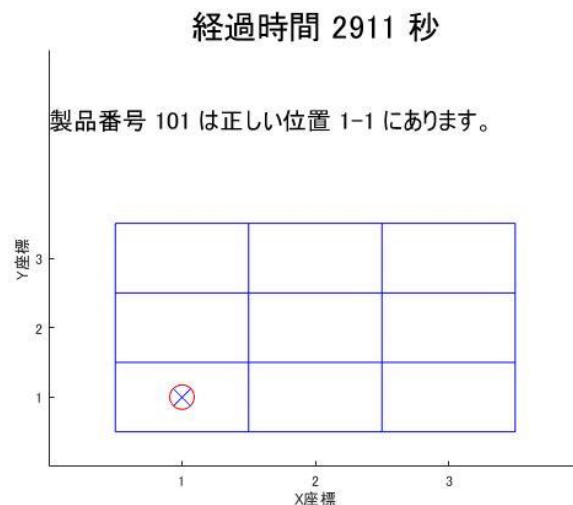


図 22 位置推定による検品作業の自動化

複数の対象を用意し、それぞれに RF タグを取り付け、各対象を仕分けする棚間口を記録したリストを用意した。対象を手に取り、その対象の仕分け先が示され、位置推定により検品がなされるまでが自動化されたことを確認した。

5 考察

実験（Ⅰ）より，静止対象物の位置推定誤差は平均 0.02m，最大 1.0m であった．最大誤差が製造現場や物流倉庫で用いられるパレットの規格（1 辺が 1.1m）よりも小さいため，本研究で提案した方法を用いることで，パレットの搬入搬出作業の際の取間違いを把握することが示された．また，実験（Ⅱ）の結果より，80cm の高さの違いを 100% の精度で推定できることが示された．棚の各段の差が 80cm 以上であれば，それらを区別することが可能であることが示された．

また，実験（Ⅲ）より，移動対象の動線推定に対しては，その推定誤差が平均 0.29m，最大 0.66m となった．これにより，製造現場や物流倉庫などの道幅がある程度ある環境において作業者の動線推定が可能であることが示唆された．

さらに，実験（Ⅳ）より，それぞれの棚の間隔が縦 30cm，横 50cm 以上ある棚間口では，どの棚間口に仕分け対象を入れたかが 100% の精度で推定できることがわかる．また，シーケンス制御装置等と組み合わせたシステムを用いることで，作業者への情報提示の手段を理解が容易な視覚情報によるものに変更することができた．以上より，仕分け作業の効率化と検品の自動化に適応可能であることが示された．

本研究の提案手法を用いることで，製造現場や倉庫などの屋内生産システム全体の生産性向上に求められる人および物の位置情報を，既存の方法よりも高精度で求めることが可能であることが示唆された．

ただし，本研究で推定モデルとして用いた k 最近傍モデルは，今回実験した現場において最も適したモデルであったに過ぎず，他の環境において k 最近傍モデルが最適となるかどうかは保証されない．

6 結言

本研究では、RFID システムを用いた屋内位置推定を対象として、マルチパスによる位置推定精度への影響を低減する方法と、アレイ式アンテナの RFID システムによる位置推定を利用した仕分け作業の効率化と検品の自動化について提案した。

測定範囲が広範囲に及ぶ場合の位置推定に対して、1 つの測位対象に高さを変えて複数の RF タグを取り付けることにより、全体での読取率を高めた。読取範囲内で測位対象の位置を変えて読取率を測定した。複数 RF タグの読取率に重み係数を乗じた合計値から測位対象の位置を推定した。また、仕分け棚を対象とした位置推定に対しては、推定された位置をシーケンサ制御装置を介したシステムにより明示する。静止対象の平面上の位置、高さおよび移動対象の動線を推定するための推定モデルは交差検証法を用いて得られる汎化誤差が最小となるモデルを選択する。

適用例により、測定範囲が広範囲に及ぶ場合の静止対象の平面上の位置推定誤差の最大値は 1.0m、平均値は 0.02m となり、フォークリフトによるパレットの搬入、搬出作業における取り違えミスを把握できる推定精度が得られることが示された。高さ推定については、測位対象の 0.2m および 1.0m の両方の高さの違いを 100%の精度で推定することができた。このことから、棚の上下段の違いを判別できる性能であることが示された。移動対象の動線推定の補正後の誤差は最大値が 0.69m、平均値は 0.22m となり、物流倉庫内での作業者の動線推定に利用できる可能性が示された。

本研究では、測定範囲内にあらかじめ設定された測定点に対して位置推定を行ったため、測定点の間では、読取率が測定されておらず、そのような点に対して推定を行うことができない。測定点の間隔と位置推定精度との関係を明らかにして、実務で求められる位置推定精度に合わせて測定点の区分の細かさを設定できるように提案方法を拡張することが今後の課題の 1 つと考える。また、実際の作業現場では機械設備などから発生する電波による影響も考えられる。

参考文献

- [1] 国土交通省 物流 3PL 事業の総合支援：
<http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/butsuryu03340.html> 2018/12/21 取得
- [2] 株式会社 新開トランスポートシステムズ サービスパーツ物流（3PL）
<http://www.stsnet.jp/services/3pl/3pl-1.html> 2018/12/21 取得
- [3] Steve Mann : Wearable Computing: A First Step Toward Personal Imaging, Proc. IEEE Computer Society, pp.25-32(1997)
- [4] 藤原貴之, 小坂忠義, 松田孝弘, 中島洋平, 櫻田崇治, 尾崎友哉 : 物流倉庫での仕分け作業におけるウェアラブルデバイス適用方式, 情報処理学会研究報告, vol.2015-MBL-76 No.1 (2015)
- [5] ムラタシステム株式会社 ゆびキタスソリューション
http://www.murata-system.co.jp/products/yubi_kitasu.html 2018/12/27 取得
- [6] 久保信明 : 「図解よくわかる 衛星測位と位置情報」, 日刊工業新聞社 (2018)
- [7] Szeliski R. : 「コンピュータビジョン—アルゴリズムと応用—」, 共立出版 (2013)
- [8] 松岡俊佑, 藤枝直輝, 市川周一, 川口秀樹 : 超音波を用いたリアルタイム位置測位システムの開発, 日本 AEM 学会誌, vol. 23, No.2, pp.132-137 (2015)
- [9] 工藤大希, 堀川三好, 古館達也, 岡本東 : BLE 即位および PDR を用いたハイブリッド屋内測位手法の提案, 情報処理学会第 79 回全国大会, 3U-05, pp.325-326 (2017)
- [10] Sadr R. : Radio Frequency Identification Tag Location Estimation and Tracking System and Method, United States Patent Application Publication, US 2012/0139704 A1 (2012)
- [11] Sekiguchi T, Yu Yating, Kajihara Y., Mukai T., Hirata K., Hida T. and Eguchi M. : Development of RFID Positioning System Using Neural Network Model, *Asia Pacific J. Ind. Manage.*, Vol.5, No.1, pp.8-16 (2014)
- [12] 一般社団法人自動認識システム協会 : 「よくわかる RFID (改訂 2 版) —電子タグのすべて—」, オーム社, (2014)

[13] 向拓哉 : UHF 帯 RFID を用いた作業分析手法に関する研究, (2015)

謝辞

本研究を行うにあたり，ご指導及び有益な助言を頂きました梶原康博教授に深く感謝の意を表します．

また，本論文を作成する上で有益な助言を頂きました審査委員の松田崇弘教授，福井隆雄准教授に深く感謝申し上げます．

最後に，本研究を遂行する上で多大なご助力を頂きました研究室の諸兄に深く感謝いたします．

2019 年 1 月

田渕 雄也